

# Особенности СВЧ-фотопроводимости природного алмаза в спектральной области 200–250 nm

© А.Г. Захаров, Н.А. Поклонский, В.С. Вариченко, А.Г. Гонтарь\*

Белорусский государственный университет,  
220050 Минск, Белоруссия

\* Институт сверхтвердых материалов Академии наук Украины,  
252153 Киев, Украина

E-mail: heii@phys.bs.uibcl.by

(Поступила в Редакцию 3 июня 1999 г.  
В окончательной редакции 7 сентября 1999 г.)

Методами фотопроводимости на сверхвысоких частотах (СВЧ-ФП) и постоянном токе (НЧ-ФП), а также оптического поглощения исследовались механически полированные пластины природного алмаза типов *IIa* и *Ia*. Показано, что высокая дефектно-примесная неоднородность и поликристалличность образцов обуславливают различия в спектральном распределении СВЧ-ФП и НЧ-ФП. Предполагается, что при подсветке алмаза неравновесные дырки захватываются на границы кристаллитов, а электроны "осциллируют" внутри кристаллитов в течение их времени жизни. Продемонстрировано различное влияние химической и механической обработки алмаза на СВЧ-ФП и НЧ-ФП.

Фотопроводимость на постоянном токе, т.е. на низких частотах (НЧ-ФП), является одним из важнейших методов исследования дефектов в полупроводниках и диэлектриках [1,2]. Однако применительно к исследованию алмаза контактные методы имеют ряд недостатков: 1) технология изготовления омических контактов к кристаллам алмаза *i*- и *n*-типа электропроводности в настоящее время не разработана, 2) спектр НЧ-ФП завит от напряженности внешнего электрического поля [3]. Это обуславливает необходимость применения бесконтактных неразрушающих методик исследования фотопроводимости алмаза, например в СВЧ-диапазоне [4].

Цель работы — установление закономерностей влияния дефектно-примесного состава и обработки поверхности природного алмаза на СВЧ-ФП при фотовозбуждении в области длин волн  $\lambda \approx 200\text{--}250\text{ nm}$ .

## 1. Методика эксперимента

Исследовались механически полированные пластины природного алмаза типа *IIa* (концентрация азота в *A*-форме  $N_A \approx 3 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ) и *Ia* ( $N_A \approx 3 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ , концентрация азота в *B1*-форме  $N_{B1} \approx 3 \cdot 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ) объемом  $V_a \approx 8 \times 5 \times 0.5\text{ mm}^3$  и массой 0.09–0.11 карат. Перед измерениями образцы травились в растворе  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ , промывались в кипящей дистиллированной воде и высушивались на воздухе. Измерения проводились при комнатной температуре.

При измерениях СВЧ-ФП образцы помещались в пучность электрической компоненты поля  $E_0 \exp(-i\omega t)$  частотой  $f = \omega/2\pi = 9.6\text{ GHz}$  (центр прямоугольного резонатора типа  $H_{101}$ ). Амплитуда напряженности электрического поля в пустом резонаторе  $E_0 \approx 100\text{ V/cm}$  оценена из экспериментально определенных добротности  $Q \approx 1100$  и величины подводимой к резонатору мощности  $P = 26\text{ mW}$  по формуле [5]  $E_0 = \sqrt{2QP/(\omega\epsilon_0 V)}$ ,

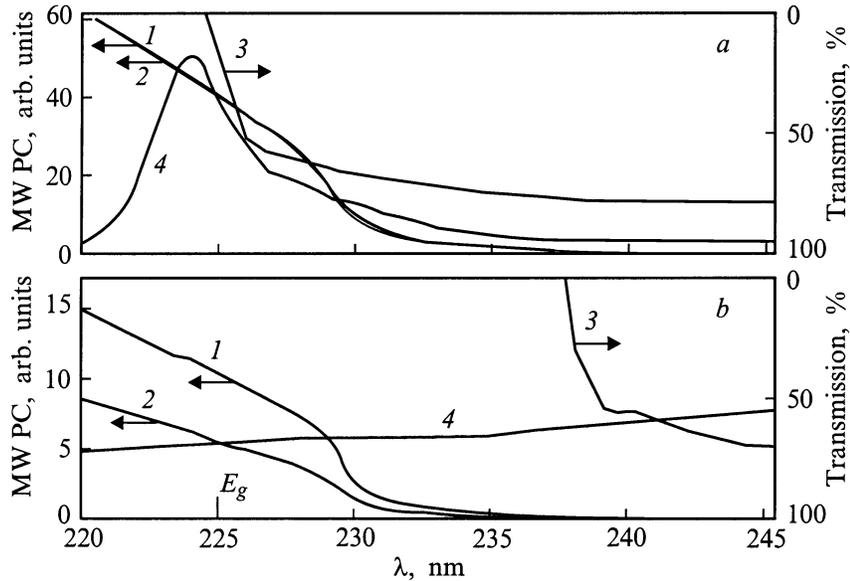
где  $V \approx 1\text{ cm}^3$  — часть объема резонатора, в которой сосредоточена практически вся электрическая компонента СВЧ-поля,  $\epsilon_0 = 8.85\text{ pF/m}$  — электрическая постоянная. Неравновесные носители заряда возбуждались прошедшим через монохроматор МДР-12 модулированным (300 Hz) излучением ксеноновой лампы мощностью 1 kW. Засветка пластин осуществлялась поочередно с двух сторон. Интенсивность фотовозбуждения была такой, что скин-эффектом и плазменным отражением СВЧ-поля от образца можно было пренебречь. За нулевой уровень СВЧ-ФП принималась величина обратной добротности резонатора с образцом без подсветки. Регистрация СВЧ-ФП производилась в режиме синхронного детектирования. Амплитуда напряженности электрической компоненты СВЧ-поля внутри образца есть  $E_0/\epsilon_r$ , где  $\epsilon_r = 5.7$  — относительная диэлектрическая проницаемость алмаза. Поглощаемая в резонаторе СВЧ-мощность  $P_a$  при засветке образца объемом  $V_a$  равна

$$P_a = \frac{1}{2} \left( \frac{E_0}{\epsilon_r} \right)^2 \int_{V_a} \text{Re } \sigma(\mathbf{r}) d^3\mathbf{r} \approx \frac{A}{2} \left( \frac{E_0}{\epsilon_r} \right)^2 \frac{\text{Re } \sigma}{\alpha(\lambda)}, \quad (1)$$

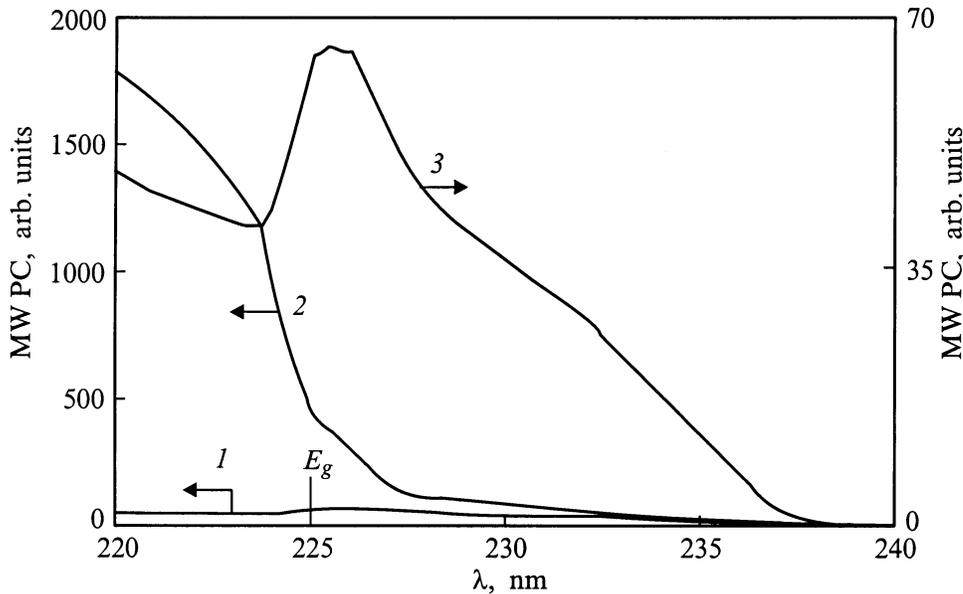
где  $\text{Re } \sigma(\mathbf{r})$  — действительная часть локальной фотопроводимости,  $A$  — освещаемая площадь образца,  $1/\alpha(\lambda)$  — глубина возбуждения неравновесных носителей заряда светом с длиной волны  $\lambda$  в области фундаментального поглощения алмаза,  $\text{Re } \sigma$  — среднее значение индуцированной подсветкой реальной части электропроводности при коэффициенте поглощения света  $\alpha(\lambda)$ .

При измерениях НЧ-ФП источником света служила дейтериевая лампа мощностью 25 W. Разность потенциалов между токовыми контактами из аквадага к алмазу составляла 50 V ( $E_{dc} \approx 100\text{ V/cm}$ ).

Спектры оптического поглощения (пропускания) образцов измерялись на спектрофотометре SPECORD-M40.



**Рис. 1.** Типичные спектры фотопроводимости и пропускания образцов алмаза *IIa* ( $N_A \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ): 1, 2 — СВЧ-фотопроводимость при возбуждении светом с двух сторон алмазной пластины (спектральная ширина щели  $\Delta\lambda = 2.4 \text{ nm}$ ). Здесь и далее спектры СВЧ-ФП пронормированы на количество квантов возбуждающего излучения; 3 — пропускание света ( $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$ ); 4 — фотопроводимость на постоянном токе (масштаб для НЧ-ФП по оси ординат не определен) (а). Типичные спектры фотопроводимости и пропускания образцов алмаза типа *Ia* ( $N_A \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_{B1} \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) (b).



**Рис. 2.** Спектры СВЧ-ФП образца алмаза типа *Ia* до (1) и после (2) химической очистки в  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$  с последующей "полировкой" поверхности корундовым порошком (диаметр зерна  $14 \mu\text{m}$ ); 1 — спектральная ширина щели  $\Delta\lambda = 1.2 \text{ nm}$ , 2 —  $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$ , 3 — детальное представление кривой 1.

## 2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Типичные спектры фотопроводимости и оптического поглощения представлены на рис. 1, 2. Видно, что СВЧ-ФП и НЧ-ФП в спектральной области 200–250 nm имеет существенные отличия.

1) Спектры НЧ-ФП алмазов типа *Ia* и *IIa* являются различными и типичными для этих алмазов [6,7], но спектральное распределение СВЧ-ФП у них оказывается практически одинаковым.

2) При уменьшении длины волны возбуждающего света ( $\lambda \approx 223\text{--}220 \text{ nm}$ ) наблюдается уменьшение НЧ-ФП, но рост СВЧ-ФП (рис. 1, а, b).

3) После химической очистки алмаза в  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4 + H_2O$  механическая обработка корундовым порошком ( $14 \mu m$ ) с последующей промывкой в кипящей  $H_2O$  и сушкой на воздухе приводит к росту СВЧ-ФП на порядок и более (рис. 2). Однако при этом же способе подготовки поверхности алмаза к измерениям НЧ-ФП происходит "закорачивание" электрической цепи либо сразу при подключении электрических зондов, либо примерно в тот момент, когда при "развертке" подсветки (из области длинных волн к более коротким) длина волны  $\lambda$  становится равной 225–235 нм.

2.2. Рассмотрим первое из указанных в п. 2.1 отличий. Известно [7,8], что природный алмаз является чрезвычайно неоднородным материалом, а алмазы типа II и близкие к ним, кроме того, имеют блочное строение. Блоки (кристаллиты) имеют характерные размеры  $L$  от 1 до  $100 \mu m$ , а углы разориентации до  $1^\circ$  [8]. Рассмотрим, как эти факторы влияют на СВЧ-ФП и НЧ-ФП.

Экспериментальные исследования облученных частицами высоких энергий кристаллических полупроводников показали [9], что введение собственных радиационных дефектов смещает уровень Ферми в запрещенной зоне к положению  $E_F^*$ , которое не зависит от примесного состава и условий облучения. В частности, по расчетам [9], у алмаза предельное положение уровня Ферми, отсчитанное от потолка  $v$ -зоны,  $E_F^* \approx 0.4 \cdot E_g$ , где  $E_g \approx 5.5 eV$  — ширина запрещенной зоны алмаза при температуре 300 К.

Предположим, что в алмазе на границе раздела двух кристаллов положение уровня Ферми  $E_F^*$  определяется теми же дефектами, что и в сильнооблученном кристалле. Уровень Ферми в объеме нелегированного кристаллита расположен у середины запрещенной зоны. Тогда поверхностные состояния на границе будут иметь отрицательный заряд, а объем кристаллита — положительный, так что возникает двойной электрический слой. Это создает межкристаллический энергетический барьер для электронов проводимости  $c$ -зоны [10] высотой  $\approx 0.1E_g$ , много больший средней тепловой энергии электрона  $3k_B T/2$ . В условиях эксперимента при подсветке неравновесные дырки захватываются на границы кристаллита, а равное им число "локализованных" электронов в течение времени их жизни "осциллирует" в кристаллите (наподобие электрона  $F$ -центра в решетке NaCl).

Для описания СВЧ-ФП поликристаллического алмаза рассмотрим модели электропроводности по Друде и Лоренцу [1,2,11,12] одного кристаллита. Считаем, что средняя длина свободного пробега электрона проводимости много меньше размеров кристаллита  $L$ , а время жизни  $\tau_n$  много больше времени релаксации квазиимпульса  $\tau_c$ .

По модели Друде зависимость реальной части электропроводности кристаллита от частоты СВЧ-поля  $\omega = 2\pi f$  имеет вид [11]

$$Re \sigma_D = \frac{\sigma_{dc}}{1 + (\omega\tau_c)^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{dc} = e^2 n \tau_c / m_c$  — электропроводность на постоянном токе,  $e$  — модуль заряда электрона,  $m_c \approx 0.48 m_0$  — эффективная масса электропроводности электрона в

$c$ -зоне алмаза,  $n$  — концентрация неравновесных электронов проводимости в "среднем" кристаллите,  $\tau_c = \mu_n m_c / e \approx 5 \cdot 10^{-13} s$  — среднее время релаксации квазиимпульса электронов проводимости внутри кристаллита,  $\mu_n \approx 2000 cm^2 / (V \cdot s)$  [13] — подвижность электронов при температуре  $T \approx 300 K$ , так как СВЧ-поле в алмазе  $E_{ac} = E_0 / (\epsilon_r \sqrt{2}) \approx 13 V/cm$  не разогревает электроны.

По модели Лоренца уравнение движения электрона  $c$ -зоны в пределах кристаллита под действием электрической компоненты СВЧ-поля есть

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{\tau_c dt} + \omega_0^2 x = -\frac{eE_0}{m_c \epsilon_r} \exp(-i\omega t), \quad (3)$$

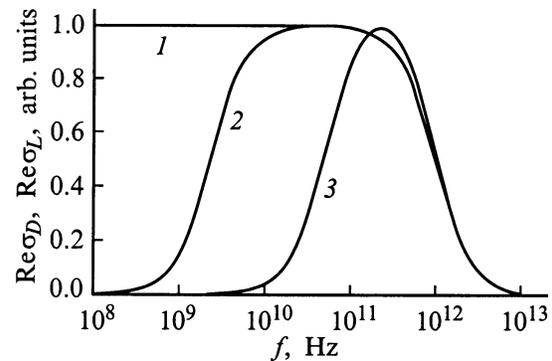
где  $x(t)$  — смещение электрона от центра кристаллита вдоль электрической компоненты СВЧ-поля,  $\omega_0$  — собственная частота осцилляций неравновесного электрона в кристаллите до рекомбинации с дыркой на его границе.

Частоту  $\omega_0$  оценим по модели осциллятора: квазиупругая сила, возвращающая электрон в центр кристаллита, пропорциональна смещению из "равновесия" и константе упругости  $k$ , так что  $\omega_0 = \sqrt{k/m_c}$ . Полагаем, что амплитуда смещения неравновесного электрона от центра кристаллита равна  $L/2$  (рекомбинация с дыркой на границе кристаллита или отражение). Тогда на основании теоремы вириала [14] для гармонического осциллятора (средняя потенциальная энергия равна средней кинетической энергии) имеем:  $k(L/2)^2 = 3k_B T$ , следовательно,  $\omega_0 = (2/L)\sqrt{3k_B T/m_c}$ .

Из решения уравнения (3) находим плотность тока —  $en dx/dt$  и реальную часть электропроводности кристаллита по модели Лоренца [12]

$$Re \sigma_L = \sigma_{dc} \frac{(\omega/\tau_c)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau_c)^2}. \quad (4)$$

Подставляя  $Re \sigma_D$  и  $Re \sigma_L$  в формулу (1), получаем (рис. 3), что при частоте  $f = 9.6 GHz$  кристаллиты с размерами  $L \leq 0.5 \mu m$  не будут давать вклада в СВЧ-ФП.



**Рис. 3.** Рассчитанное по формуле (1) поглощение СВЧ-мощности электронами проводимости  $P_a$  в образце алмаза: 1 — расчет  $Re \sigma_D / \sigma_{dc}$  по модели Друде при  $\tau_c \approx 5 \cdot 10^{-13} s$ ; 2, 3 — расчет  $Re \sigma_L / \sigma_{dc}$  по модели Лоренца для алмаза, имеющего блочное строение. 2 ( $L \approx 2 \mu m$ ), 3 ( $L \approx 0.5 \mu m$ ).

Видно, что при  $L > 2 \mu\text{m}$  поглощение неравновесными электронами кристаллита  $P_a$  в СВЧ-диапазоне практически не зависит от частоты поля  $f$ . В то же время по модели Друде практически во всем СВЧ-диапазоне (0.3–300 GHz) поглощение СВЧ-мощности не зависит от размера кристаллита  $L$  (при условии, что средний размер кристаллита  $L$  много больше длины свободного пробега).

Отметим, что наблюдаемые нами особенности СВЧ-ФП напоминают проявление амплитудного размерного эффекта [15], однако имеют иную природу. В самом деле, амплитудный размерный эффект возникает тогда, когда удвоенная амплитуда колебаний электрона проводимости  $2a = \mu_n E_{ac}/f$  в переменном электрическом поле частотой  $f$  начинает превышать размер кристаллита  $L$ , так что траектория электрона перестает "умещаться" в кристаллите:  $2a/L \geq 1$ . Поэтому, если переходы электронов проводимости между кристаллитами затруднены из-за барьера между ними, то часть периода СВЧ-поля электроны проводят "прижатыми" к границе кристаллита, не совершая работы. В результате плотность мощности, поглощаемой в образце, становится меньше обычной (по модели Друде) величины  $\sigma_{dc} E_0^2 / (2\varepsilon_r^2) = \sigma_{dc} E_{ac}^2 / \varepsilon_r^2$ . Однако из условия  $fL \leq \mu_n E_{ac}$  следует, что амплитудный размерный эффект проявляется при наших условиях измерения СВЧ-ФП лишь для кристаллитов с размерами  $L \leq 0.03 \mu\text{m}$ .

Таким образом, при размерах кристаллитов  $L > 2 \mu\text{m}$  величина и спектральное распределение СВЧ-ФП по модели Лоренца оказываются таким же, как в монокристаллическом образце (межкристаллитные границы не проявляются). При измерениях фотопроводимости в режиме постоянного тока (НЧ-ФП) наличие кристаллитов приводит к поляризации алмаза. Величина поляризации зависит от местоположения контактов и соотношения между проводимостью кристаллита и проводимостью по межкристаллитному промежутку [16].

Экспериментальным подтверждением предлагаемой модели могут также служить данные, полученные нами при исследовании механически полированных пластин, вырезанных из природных алмазов, и эпитаксиальных алмазных пленок. В образцах, у которых в спектрах катодолуминесценции (10 kV; 6  $\mu\text{A}$ ; диаметр электронного пучка  $\approx 1 \text{mm}$ ) присутствует линия излучения свободного экситона (235 nm), величина СВЧ-ФП была наибольшей при подсветке зона-зона (в собственной области поглощения). Отметим, однако, что среди образцов алмаза, имеющих наибольший сигнал собственной СВЧ-ФП, были такие, у которых излучения свободного экситона зафиксировано не было. Это объясняется существующей теорией внутреннего фотоэффекта: неравновесные носители заряда противоположных знаков пространственно разделяются на границах кристаллитов, что препятствует образованию экситонов [1,2].

Однако наше исследование алмазных поликристаллических пленок показало, что даже при регистрации интенсивной (по сравнению с природными алмазами)

линии излучения свободного экситона сигнал СВЧ-ФП при подсветке в собственной области не регистрируется. Данный экспериментальный факт не удается объяснить исходя из теории внутреннего фотоэффекта [1,2]. Согласно же оценкам по формулам (1), (2) и (4), это, возможно, связано с тем, что характерный размер кристаллита  $L \leq 0.5 \mu\text{m}$ . Действительно, при  $L \leq 0.5 \mu\text{m}$  собственная частота колебаний неравновесных электронов в кристаллите  $\omega_0 = (2/L)\sqrt{3k_B T/m_c}$  больше  $\omega = 2\pi f \approx 60.3 \text{GHz}$  и поглощения ими СВЧ-мощности не происходит.

Косвенно подтверждают предлагаемую модель данные [17], где при  $T \approx 300 \text{K}$  наблюдался рост электропроводности поликристаллических алмазных пленок ( $L \approx 10 \mu\text{m}$ ; электроды из аквадага) с ростом частоты электрического поля в диапазоне  $f = 10^2 - 10^4 \text{Hz}$  по закону  $\text{Re } \sigma \propto f^s$ , где  $s \approx 0.6$ . Это согласуется с оценками  $\text{Re } \sigma_L$  по формуле (4); см. также рис. 3.

Сопоставим данные на рис. 1, *a* и *b*, учитывая высокую примесно-дефектную неоднородность природных алмазов [7,8]. Исследование катодолуминесценции (при возбуждении расфокусированным электронным пучком) показало, что *B1*-дефекты (пластинчатые, азотсодержащие образования в плоскости (111) с ИК-полосами поглощения 7.5, 8.5, 9.1, 9.9, 12.8  $\mu\text{m}$ ) распределены в алмазах типа *Ia* крайне неравномерно. Локальное время жизни неравновесных электронов  $\tau_n$  и их подвижность (время релаксации квазимпульса  $\tau_c$ ) в участках, содержащих *B1*-дефекты, меньше, чем в более совершенных участках.

Если глубина фотовозбуждения алмаза  $1/\alpha(\lambda)$  много больше среднего размера кристаллита  $L$ , то при равномерном освещении пластины кристаллиты, не содержащие *B1*-дефекты (индекс 1) и содержащие их (индекс 2), вносят вклад в СВЧ-ФП в отношении [18]

$$\frac{P_{a1}}{P_{a2}} = \frac{\sum_j (KV_1 \mu_{n1} \tau_{n1})_j}{\sum_l (KV_2 \mu_{n2} \tau_{n2})_l}, \quad (5)$$

где  $\mu_{n1}$ ,  $\mu_{n2}$ ,  $\tau_{n1}$ ,  $\tau_{n2}$  — подвижности и стационарные времена жизни неравновесных электронов в двух различных типах кристаллитов объемами  $V_{1j}$  и  $V_{2l}$ ,  $K_j$ ,  $K_l$  — коэффициенты вклада кристаллитов  $j$  и  $l$  в СВЧ-ФП по формуле (4) при  $T \approx 300 \text{K}$  из-за их размеров вдоль электрической компоненты СВЧ-поля:  $K_j = 0$ , если  $L_j < 0.5 \mu\text{m}$ ,  $K_j = 1$ , если  $L_j \geq 2 \mu\text{m}$ ,  $0 < K_j < 1$  при  $0.5 < L_j < 2 \mu\text{m}$ .

Таким образом, из (5) следует, что бóльший вклад в СВЧ-ФП будет давать структурно более совершенные участки образца (с индексом 1) независимо от их местоположения. При  $P_{a1} \gg P_{a2}$  величина СВЧ-ФП будет такой же, как у кристаллитов, не содержащих *B1*-дефекты, т. е. как у алмазов типа *IIa*; ср. рис. 1, *a*, *b*.

На результаты измерения НЧ-ФП алмазов, содержащих *B1*-дефекты, влияют процессы, связанные с переносом носителей заряда от одного электрического контакта

до другого. Сквозной фототок определяется подвижностью и концентрацией носителей на всем расстоянии между электродами и зависит от местоположения участков с различной величиной фотопроводимости и наличием границ кристаллов. В частности, НЧ-ФП, представленная на рис. 1, *b*, отвечает случаю, когда области, содержащие *B1*-дефекты и не содержащие их, последовательно включены в электрическую цепь.

Таким образом, первое из указанных в п. 2.1 отличий можно объяснить неоднородностью и поликристаллическим строением природных алмазов типа II и близких к ним и отсутствием проявления в СВЧ-ФП поляризационных эффектов при размере кристаллитов  $L > 2 \mu\text{m}$ .

2.3. Рассмотрим второе и третье из указанных в п. 2.1 отличий спектрального распределения СВЧ-ФП и НЧ-ФП. (Рост на порядок СВЧ-ФП после обработки алмаза корундовым порошком (рис. 2) и невозможность при таком же способе подготовки поверхности алмаза к измерениям провести регистрацию НЧ-ФП этих же образцов алмаза).

Для исследования этих отличий СВЧ-ФП проводилась обработка образцов алмаза и другими способами [19–22]: химическими растворами, температурная обработка на воздухе (200–500°C; 1 h), ионное травление. Возрастания сигнала СВЧ-ФП при этом не было получено, а ионное травление  $\text{Ag}^+$  (1 keV, 1 min) привело к необратимому изменению вида СВЧ-ФП и уменьшению его абсолютной величины. По всей вероятности, это обусловлено появлением на его поверхности "осадков", состоящих из компонентов травителей и продуктов травления [20,21] (химическая и температурная обработка), и возрастанием дефектности (ионное травление). Возможно также, что такие особенности СВЧ-ФП обусловлены наличием у поверхности алмаза отрицательного электронного сродства (электрон поглощает энергию СВЧ-поля независимо от того, находится он в образце или над ним).

Таким образом, второе и третье отличие по п. 2.1 спектрального распределения СВЧ-ФП и НЧ-ФП объясняется иной чувствительностью метода СВЧ-ФП к состоянию поверхности исследуемых образцов по сравнению с НЧ-ФП.

Итак, СВЧ-ФП и НЧ-ФП при исследовании одних и тех же природных алмазных пластин имеют различные спектральные распределения при фотовозбуждении в диапазоне длин волн  $\lambda = 200\text{--}250 \text{ nm}$ . Различие СВЧ-ФП и НЧ-ФП у алмазов типов Ia и IIa интерпретировано исходя из разработанной модели СВЧ-ФП, учитывающей особенность движения неравновесных электронов в образцах, имеющих блочное строение. Из модели следует, что при  $T \approx 300 \text{ K}$  на результаты измерений методом СВЧ-ФП ( $f \approx 9.6 \text{ GHz}$ ) наличие блоков (кристаллитов) с размером  $L$  более  $2 \mu\text{m}$  не влияет, а кристаллиты с размером менее  $0.5 \mu\text{m}$  не вносят вклад в СВЧ-ФП. Продемонстрировано различное влияние химической и механической обработки алмаза на спектральное распределение СВЧ-ФП и НЧ-ФП.

## Список литературы

- [1] А.Н. Васильев, В.В. Михайлов. Введение в спектроскопию твердого тела. МГУ, М. (1987). 192 с.
- [2] P.Y. Yu, M. Cardona. *Fundamentals of Semiconductors*. Springer, Berlin (1999). 620 p.
- [3] P. Gonon, S. Prawer, Y. Boiko, D.N. Jamieson. *Diamond and Related Materials* **6**, 860 (1997).
- [4] В.А. Миляев, В.А. Санина. *Изв. вузов. Радиофизика* **23**, 4, 407 (1980).
- [5] Ч. Пул. *Техника ЭПР-спектроскопии*. Мир, М. (1970). 557 с.
- [6] P. Denham, E.C. Lightowers, P.J. Dean. *Phys. Rev.* **161**, 3, 762 (1967).
- [7] В.С. Вавилов, А.А. Гиппиус, Е.А. Конорова. *Электронные и оптические процессы в алмазе*. Наука, М. (1985). 120 с.
- [8] Г.Б. Бокий, Г.Н. Безруков, Ю.А. Клюев, А.М. Налетов, В.И. Непша. *Природные и синтетические алмазы / Под ред. И.И. Шафрановского*. Наука, М. (1986). 224 с.
- [9] В.Н. Брудный, С.Н. Гриняев. *ФТП* **32**, 3, 315 (1998).
- [10] J.M. Palau, A. Ismail, L. Lassabaterre. *Solid State Electronics* **28**, 5, 499 (1985).
- [11] П. Гроссе. *Свободные электроны в твердых телах*. Мир, М. (1982). 270 с.
- [12] П.С. Киреев. *Физика полупроводников*. Высш. шк., М. (1975). 583 с.
- [13] *Физические свойства алмаза. Справочник / Под ред. Н.В. Новикова*. Наук. думка, Киев (1987). 192 с.
- [14] Б.В. Васильев, В.Л. Любошиц. *УФН* **164**, 4, 367 (1994).
- [15] Э.М. Эпштейн. *ФТП* **17**, 12, 2190 (1983).
- [16] *Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения / Под ред. Г. Харбеке*. Мир, М. (1989). 344 с.
- [17] Г.А. Соколина, А.А. Ботев, Л.Л. Буйлов, С.В. Банцек, О.И. Лазарева, А.Ф. Белянин. *ФТП* **24**, 1, 175 (1990).
- [18] В.Л. Бонч-Бруевич. *УФН* **140**, 4, 583 (1983).
- [19] В.В. Pate. *Surf. Sci.* **165**, 83 (1986).
- [20] A.T. Collins, S. Rafique. *J. Phys. C: Solid. Stat. Phys.* **11**, 1375 (1978).
- [21] A. Lepek, A. Halperin, J. Levinson. *Phys. Rev.* **B19**, 2250 (1979).
- [22] Э. Зенгуил. *Физика поверхности*. Мир, М. (1990). 536 с.